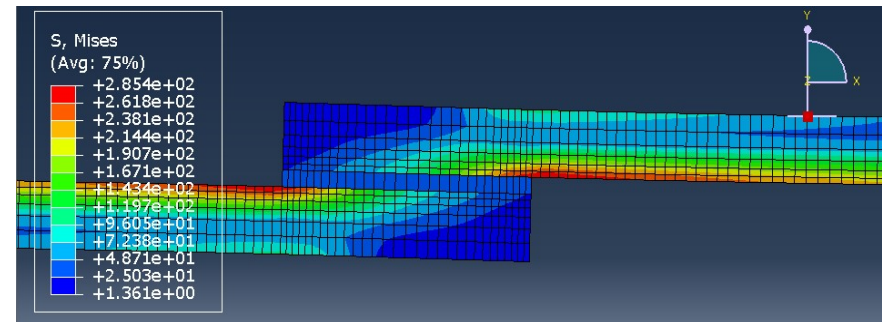
ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE JUNTAS COLADAS EM DUAS CONFIGURAÇÕES: JUNTA DE CISALHAMENTO SIMPLES E JUNTA DE CARREGAMENTO COMBINADO

MESTRANDO: RANULFO MARTINS CARNEIRO NETO

ORIENTADOR: JOAQUIM TEIXEIRA DE ASSIS

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

OBJETIVO PRINCIPAL:

- Modelagem computacional do comportamento mecânicos das juntas de aço carbono coladas com o adesivo estrutural e a comparação dos resultados teóricos com os experimentais

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

Experimentos

Juntas para levantamento de propriedades

Juntas de Cisalhamento Simples

Juntas de Carregamento Combinado

Propriedades do adesivo

Mudanças geométricas

Mudanças geométricas e na espessura adesiva

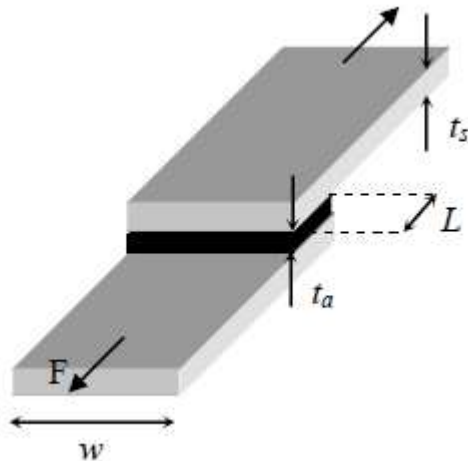
MODELAGEM COMPUTACIONAL

Avaliação qualitativa da resistência com o tempo

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO UERJ

IPRJ

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES:

É o tipo de junta mais comum dentre os tipos de juntas coladas

TRABALHO EXPERIMENTAL:

TESE DE **DA SILVA (2010):**

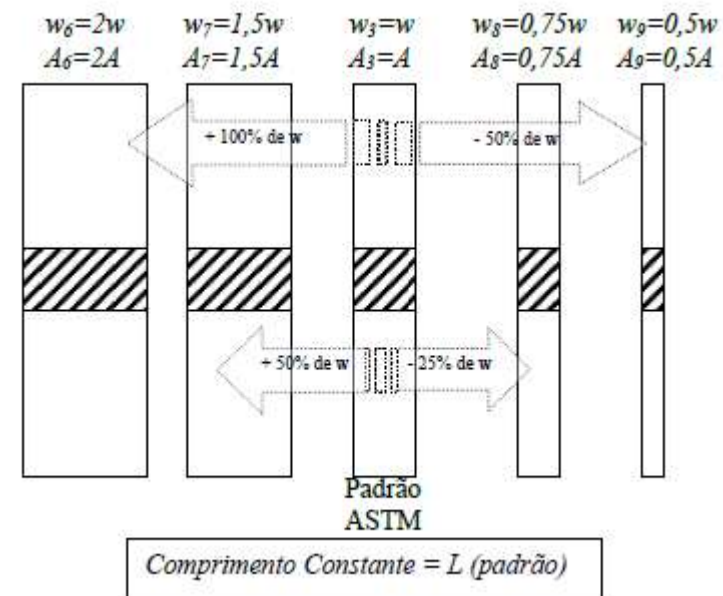
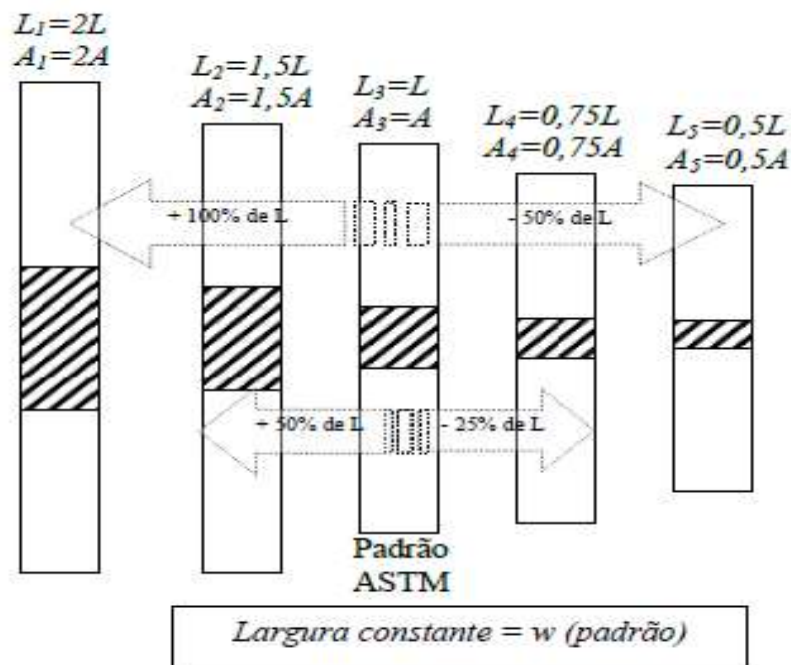
Substrato: Aço carbono

Adesivo: ARC 858

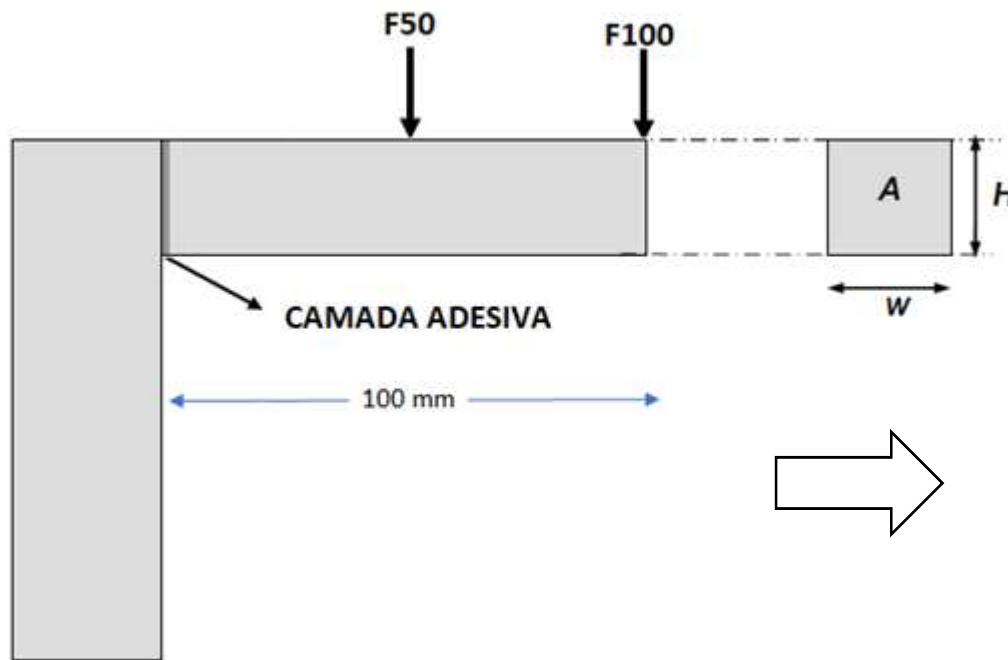
Grupo		Comprimento	Largura	Area
Análise da Influência da variação do comprimento da região colada	1	2L	W	2A
	2	1,5L	W	1,5A
	3 (ASTM)	L	W	A
	4	0,75L	W	0,75A
	5	0,5L	W	0,5A
Análise da Influência da variação da largura da região colada	6	L	2w	2A
	7	L	1,5w	1,5A
	8	L	0,75w	0,75A
	9	L	0,5w	0,5A

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES - TRABALHO EXPERIMENTAL: TESE DE DA SILVA (2010):

IPRJ

Os resultados apontaram preferência por maiores larguras, considerando juntas com mesma área.

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

JUNTAS DE CARREGAMENTO COMBINADO

Avalia a resistência a tensões normais e de cisalhamento

TRABALHO EXPERIMENTAL:
TESE DE **DA SILVA (2010)**

Avaliou 9 grupos com diferentes geometrias

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

JUNTAS DE CARREGAMENTO COMBINADO - TRABALHO EXPERIMENTAL: TESE DE DA SILVA (2010):

GRUPO 1 (PERFIL QUADRADO) — 2h, w

GRUPO 2 — 1,5h, w

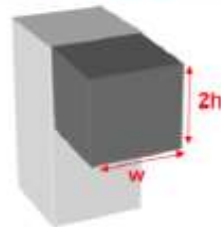
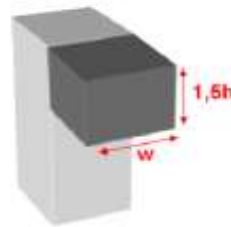
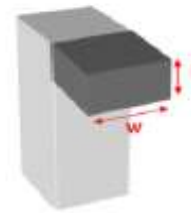
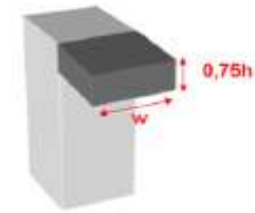
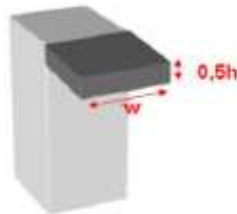
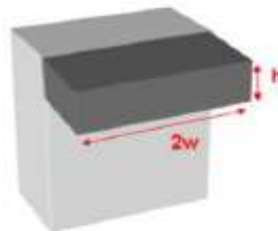
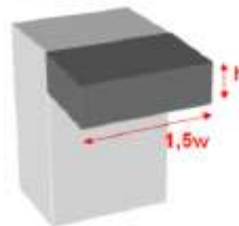
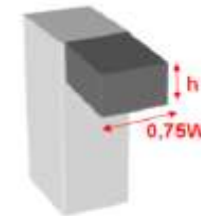
GRUPO 3 (ASTM) — h, w

GRUPO 4 — 0,75h, w

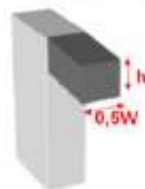
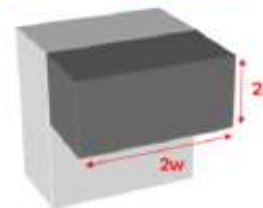
GRUPO 5 — 0,5h, w

GRUPO 6 — h, 2w

GRUPO 7 — h, 1,5w

GRUPO 8 — h, 0,75W

GRUPO 9 (PERFIL QUADRADO) — h, 0,5W

GRUPO 10 — 2h, 2w

IPRJ

Os resultados apontaram preferência por maiores alturas, considerando juntas com mesma área.

JUNTAS DE CARREGAMENTO COMBINADO - TRABALHO EXPERIMENTAL: NOVOS EXPERIMENTOS:

Grupos	Altura	Largura
1	2H	w
2	1,5H	w
3 (ASTM)	H	w
4	0,75H	w
5	0,5H	w
6	H	2w

Os resultados também apontaram preferência por maiores alturas, considerando juntas com mesma área.

JUNTAS DE CARREGAMENTO COMBINADO - TRABALHO EXPERIMENTAL: NOVOS EXPERIMENTOS – JUNTAS RECENTEMENTE COLADAS:

Grupo	Aplicação da força	FORÇADE RUPTURA (ENSAIO - JUNTA ANTIGA) - Fra	FORÇADE RUPTURA (ENSAIO - JUNTA NOVA) - Frn	Força de Ruptura (Ensaio - junta nova)	DIFERENÇA % DOS VALORES MÉDIOS - [(Fra/Frn) - 1]
1	F50	3,622 ± 0,542 (14,96%)	3,330 ± 0,579 (17,42%)	3,330 ± 0,579 (17,42%)	-8,06%
	F100	1,774 ± 0,201 (11,33%)	1,552 ± 0,083 (5,36%)	1,552 ± 0,083 (5,36%)	-12,51%

IPRJ

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

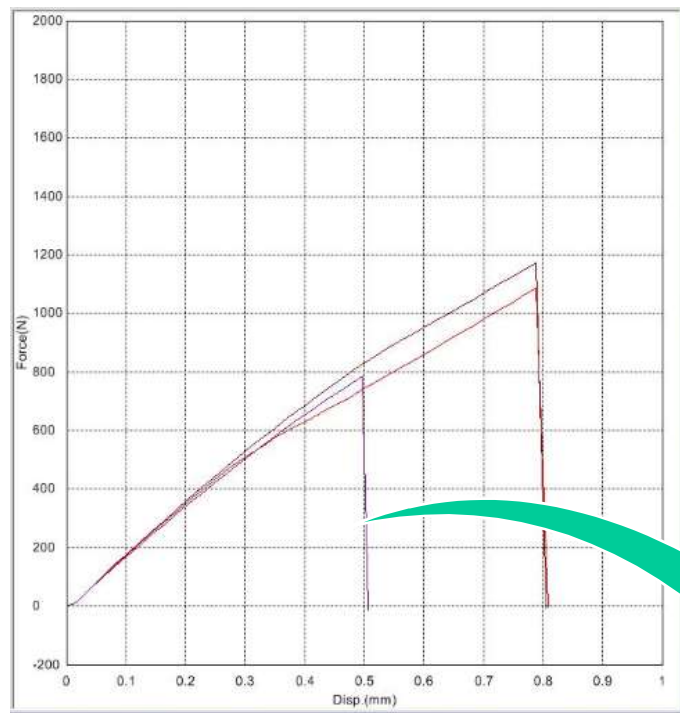
ADESIVO ARC 858 – PROPRIEDADES MACROSCÓPICAS

FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

ENSAIO DE TRAÇÃO

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

ADESIVO ARC 858 – PROPRIEDADES MACROSCÓPICAS

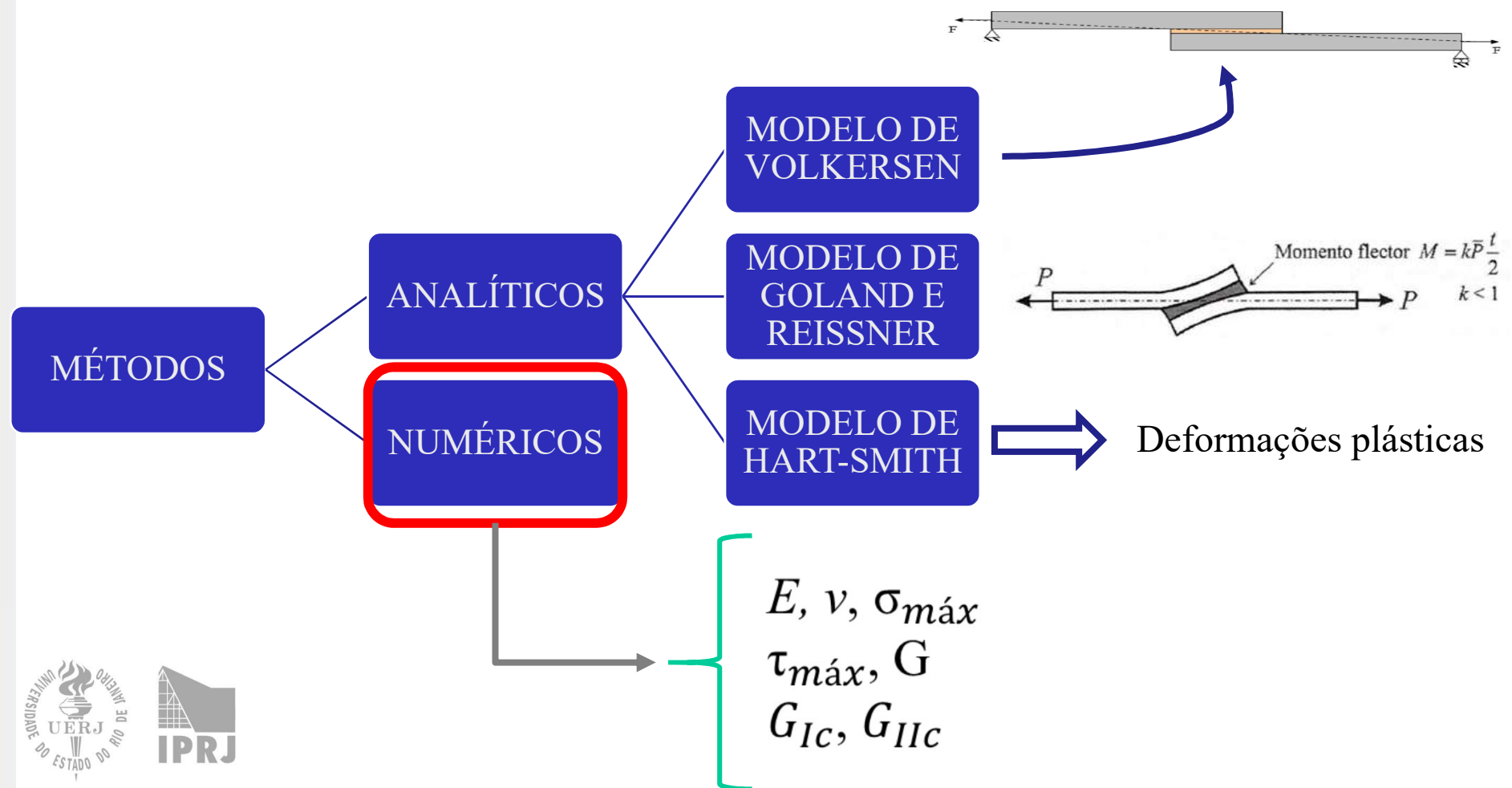
RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO:

DESCRIÇÃO	ARC 858
TENSÃO NORMAL MÁXIMA (MPa)	28,963
COEFICIENTE DE POISSON	0,329
MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	7073,031
MÓDULO DO CISALHAMENTO (MPa)	2660,819
TENSÃO CISALHAMENTO MÁXIMA (MPa)	18,0*

MÉTODOS DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA

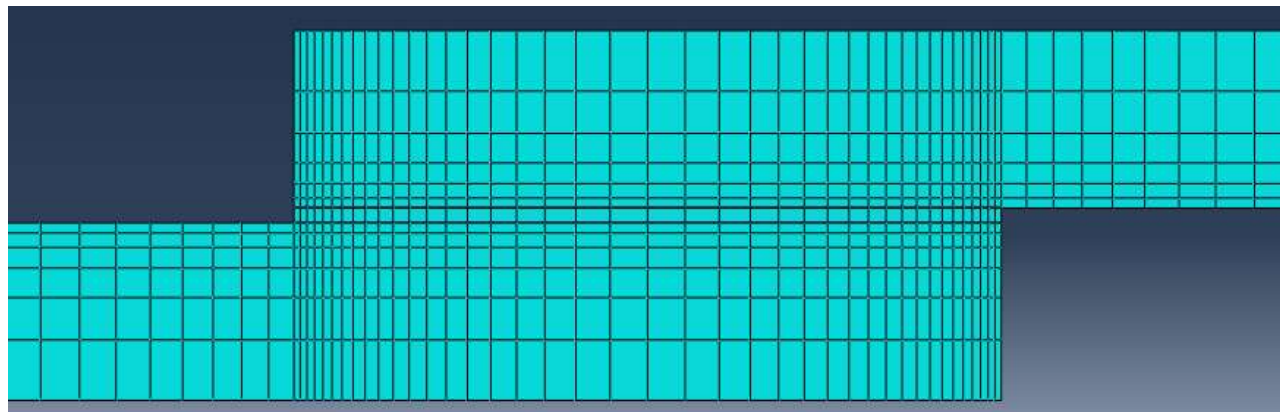
- MÉTODOS
  - ANALÍTICOS
    - MODELO DE VOLKERSEN
    - MODELO DE GOLAND E REISSNER
    - MODELO DE HART-SMITH → Deformações plásticas
  - NUMÉRICOS → E, ν, $\sigma_{máx}$; $\tau_{máx}$, G; G_{Ic}, G_{IIc}

Momento flector $M = k\bar{P}\frac{t}{2}$

$k < 1$

UERJ IPRJ

MÉTODOS NUMÉRICOS

Método dos elementos finitos

- Divide uma estrutura contínua em pequenos elementos (elementos finitos)
- Os elementos são conectados pelos nós
- Transforma um problema complexo em vários problemas simples → SOLUÇÃO APROXIMADA

MÉTODOS NUMÉRICOS

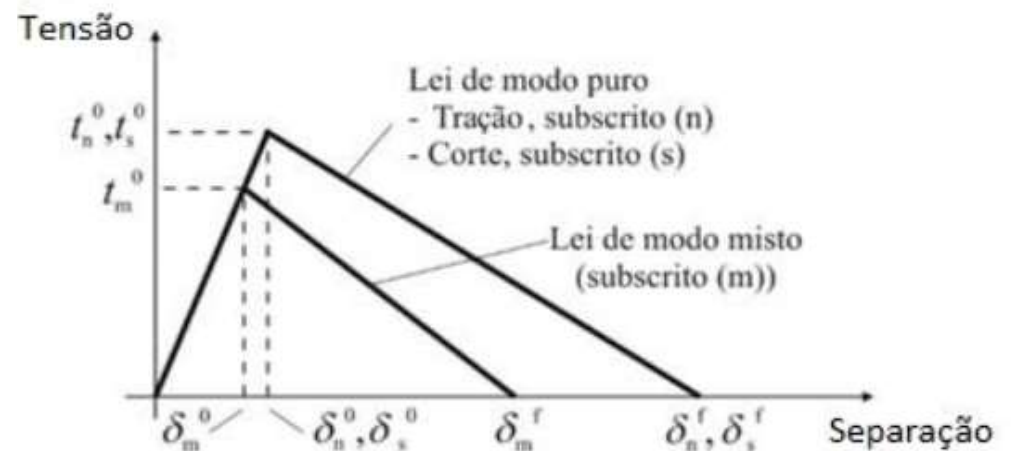
EVOLUÇÃO DAS ABORDAGENS

MECÂNICA CONTÍNUA → MECÂNICA DA FRATURA → MECÂNICA DO DANO

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

MODELOS DE DANO COESIVO:

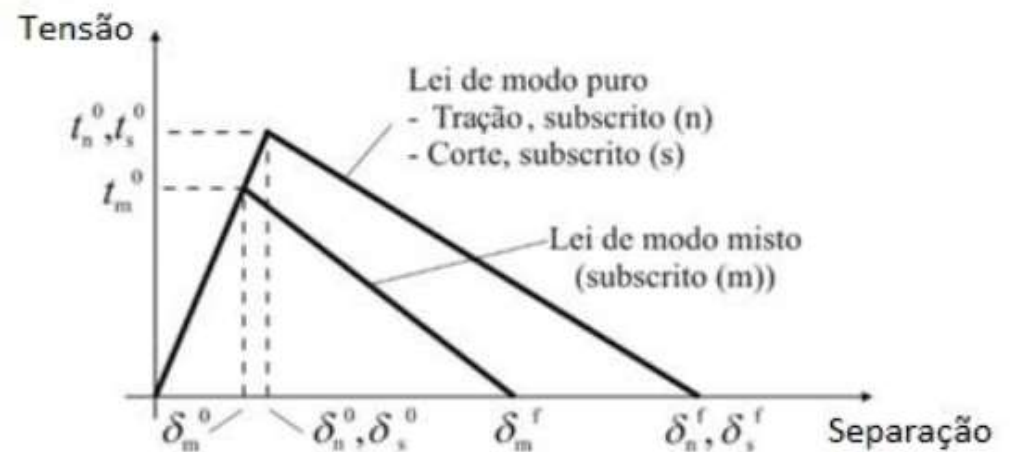
- ZONA COESIVA – Região localizada a frente da ponta da trinca

- FRATURA → Fenômeno gradual, ocorrendo a propagação da trinca na zona coesiva, sendo a mesma resistida por trações coesivas → LEIS DE TRAÇÃO E SEPARAÇÃO

LEI DE TRAÇÃO-SEPARAÇÃO – MODELO TRIANGULAR

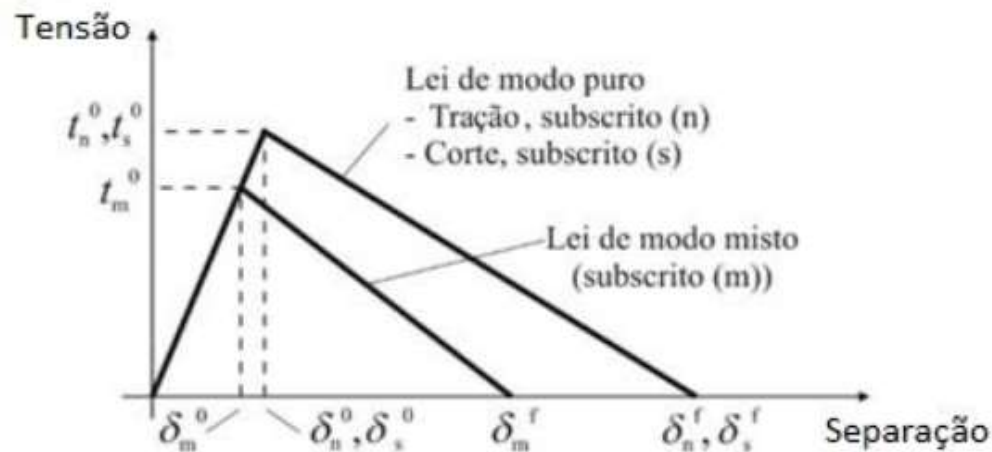
$$\boldsymbol{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{ns} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{nt} & E_{st} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = \boldsymbol{E\varepsilon}$$

- **Início do dano - critério da tensão nominal quadrática:**

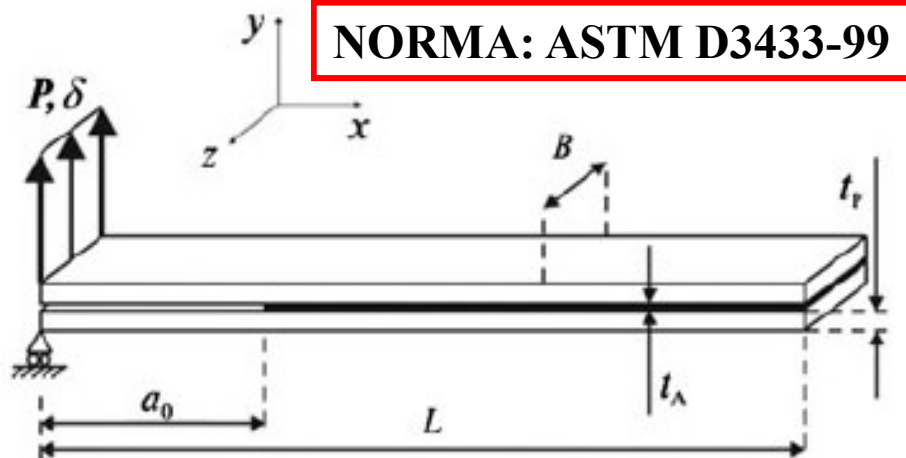
$$\left\{\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^o}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^o}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^o}\right\}^2 = 1$$

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

LEI DE TRAÇÃO-SEPARAÇÃO – MODELO TRIANGULAR

- **Evolução do dano – considera a taxa na qual a rigidez do material é degradada**
- **Critério da fratura da lei de potência (power law fracture criterion):**

$$\left\{\frac{G_n}{G_n^C}\right\}^{\alpha} + \left\{\frac{G_s}{G_s^C}\right\}^{\alpha} + \left\{\frac{G_t}{G_t^C}\right\}^{\alpha} = 1$$

ENSAIO DCB (DOUBLE CANTILEVER BEAM)

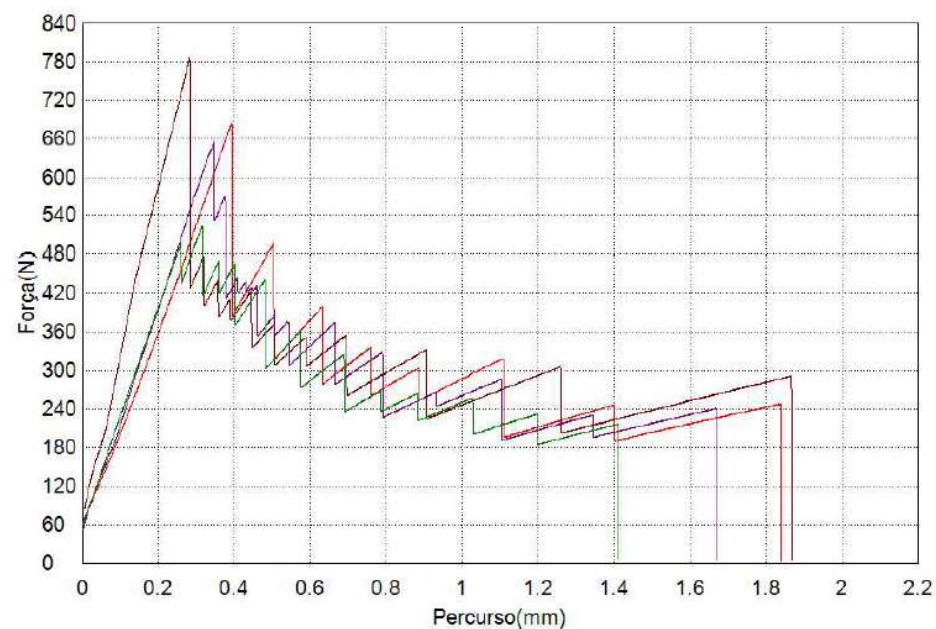
- **Muito utilizado devido a sua simplicidade**

NORMA: ASTM D3433-99

Fonte: Da Silva, 2012.

- **Dificuldade: Medição da propagação da trinca**

- **Método CBBM (compliance based beam method) – Depende apenas da flexibilidade (δ/P)**

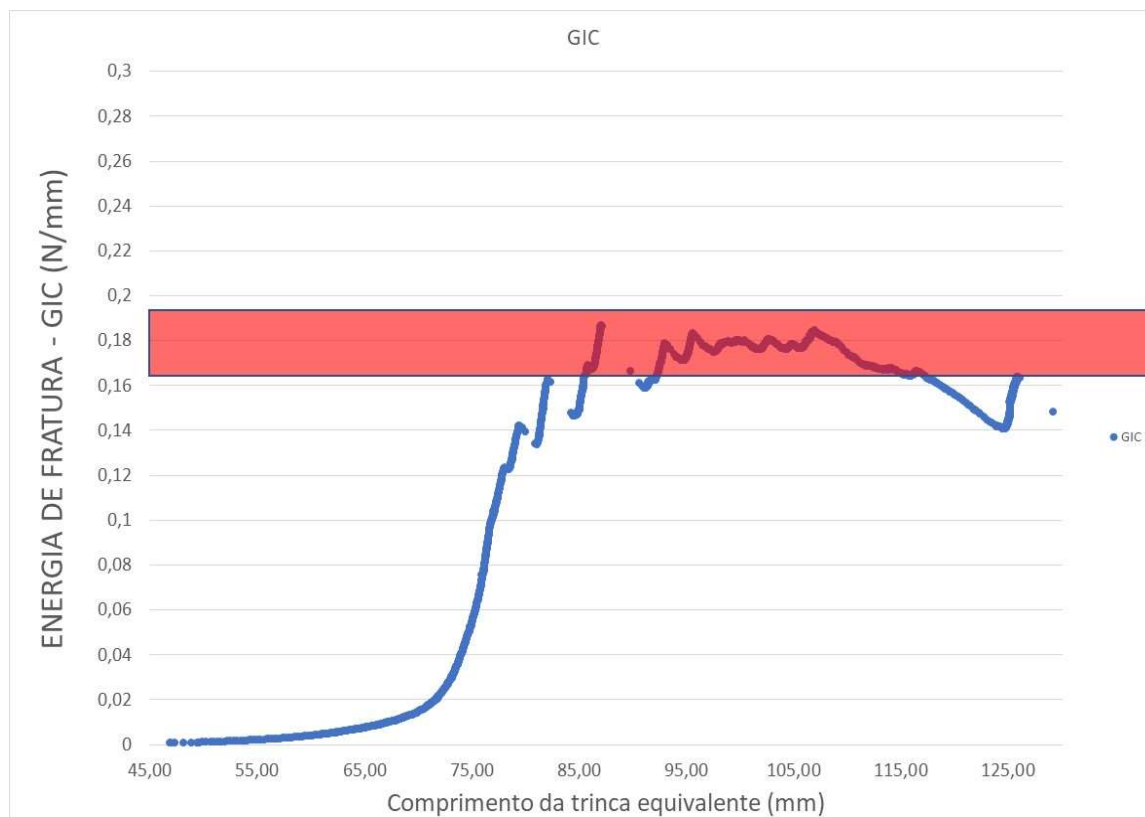
IPRJ

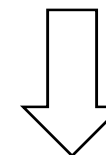
ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

ENSAIO DCB

Força x Deslocamento – Esp. 1.5 mm

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

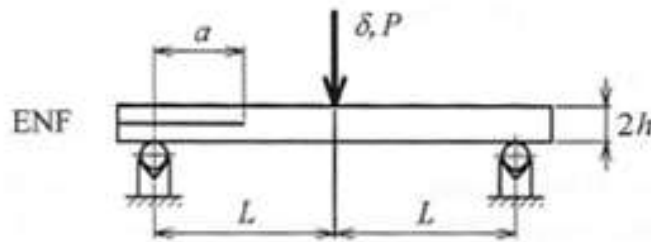
Laboratório de Adesão e Aderência

ENSAIO DCB - RESULTADOS

Fonte: O autor.

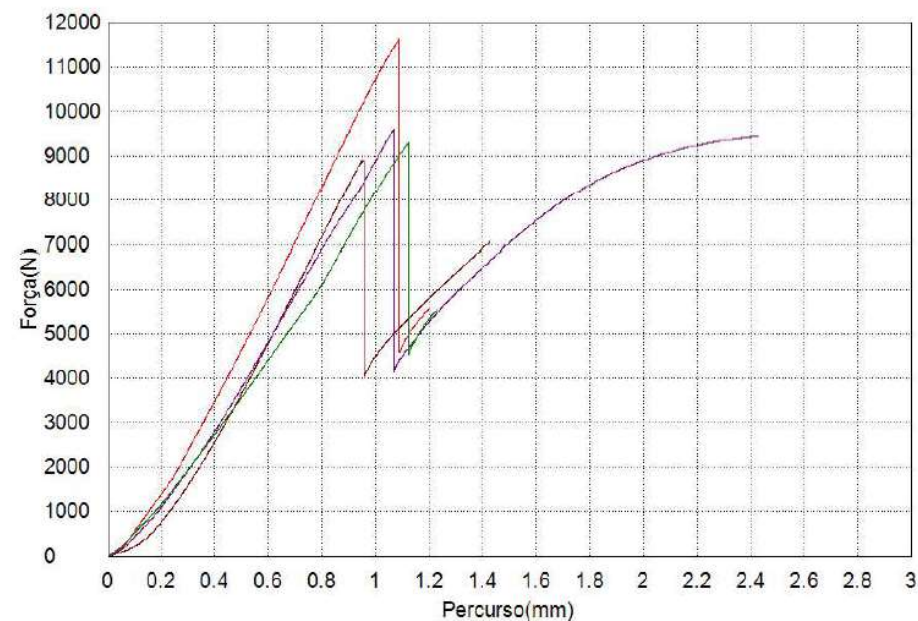
ENSAIO DCB - ARC 858		
CORPO DE PROVA	GIC (N/mm)	
	Espessura adesiva: 0,4 mm	Espessura adesiva: 1,5 mm
1	0,15	0,68
2	0,62	0,22
3	0,18	0,26
4	0,075	0,15
MÉDIA	0,26	0,33
DESVIO PADRÃO	0,25 (96%)	0,24 (73%)

ENSAIO DCB - ARC 858		
CORPO DE PROVA	GIC (N/mm)	
	Espessura adesiva: 0,4 mm	Espessura adesiva: 1,5 mm
1	0,15	0,22
2	0,18	0,26
3	0,075	0,15
MÉDIA	0,135	0,21
DESVIO PADRÃO	0,05 (40%)	0,06 (27%)

ENSAIO ENF (END NOTCH FLEXURE)

- **Muito utilizado devido a sua simplicidade**

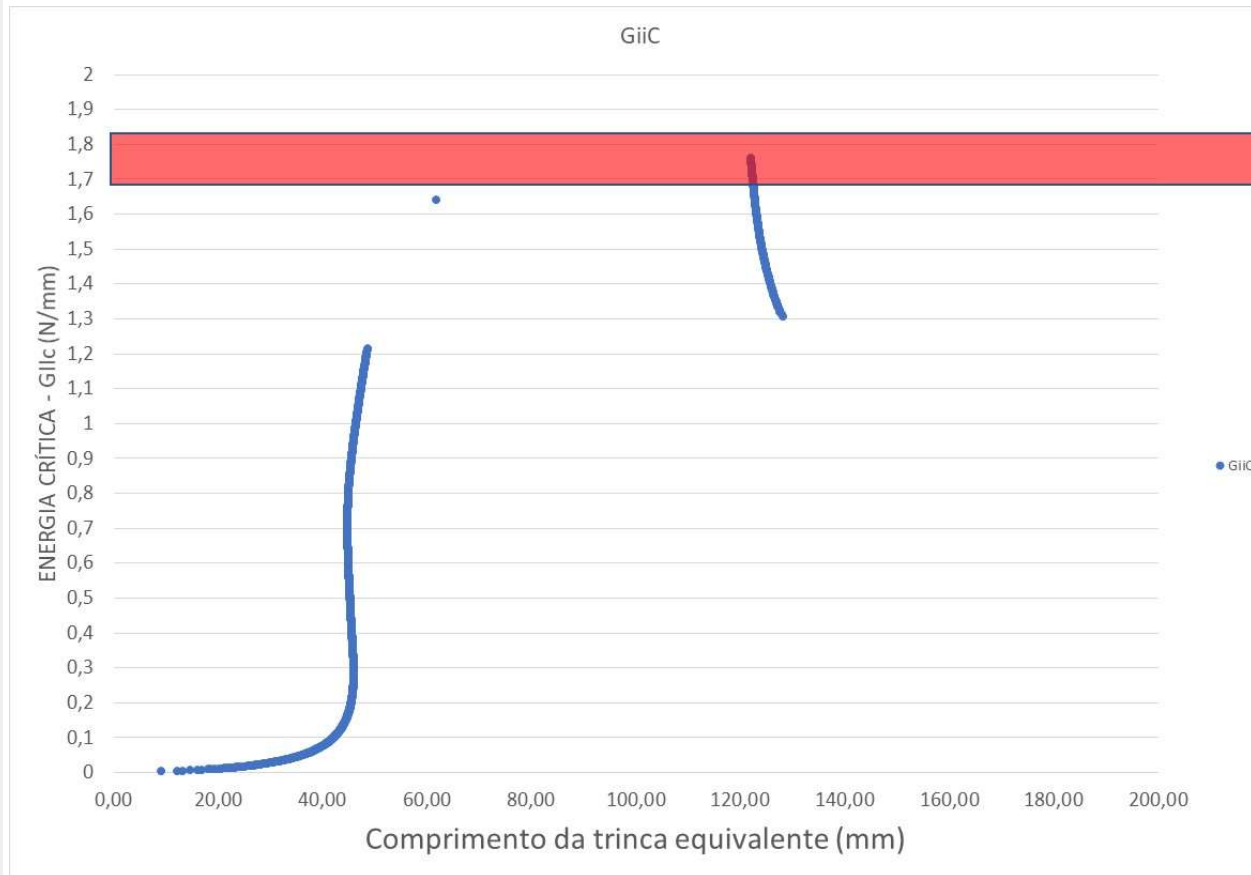
NÃO NORMALIZADO

- **Dificuldade: Medição da propagação da trinca**

- **Utilizado o Método CBBM (compliance based beam method)**

ENSAIO ENF – MÉTODO CBBM

Corpos de prova

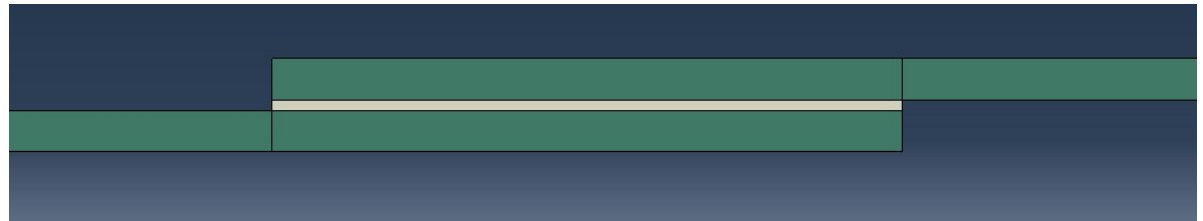
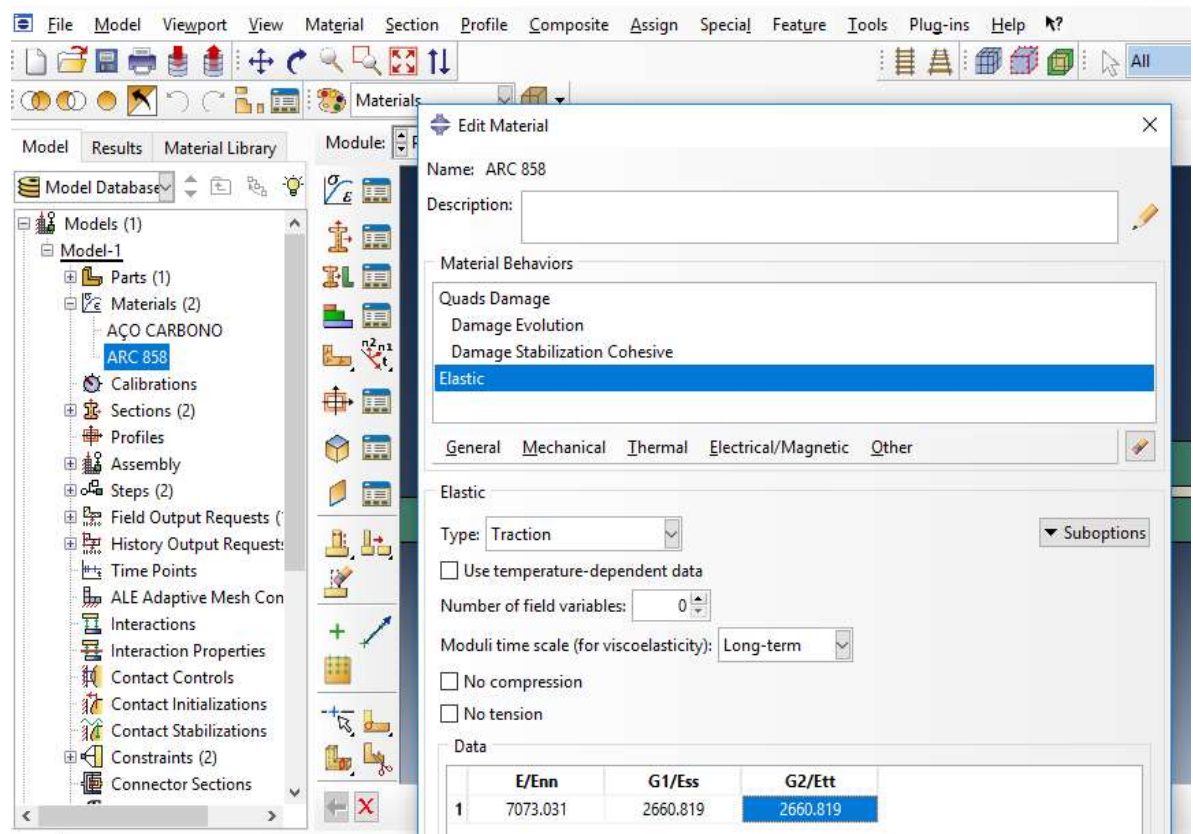
Força x Deslocamento – Esp. 0.4 mm

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

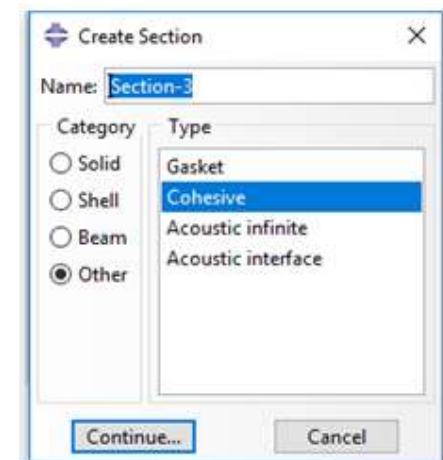
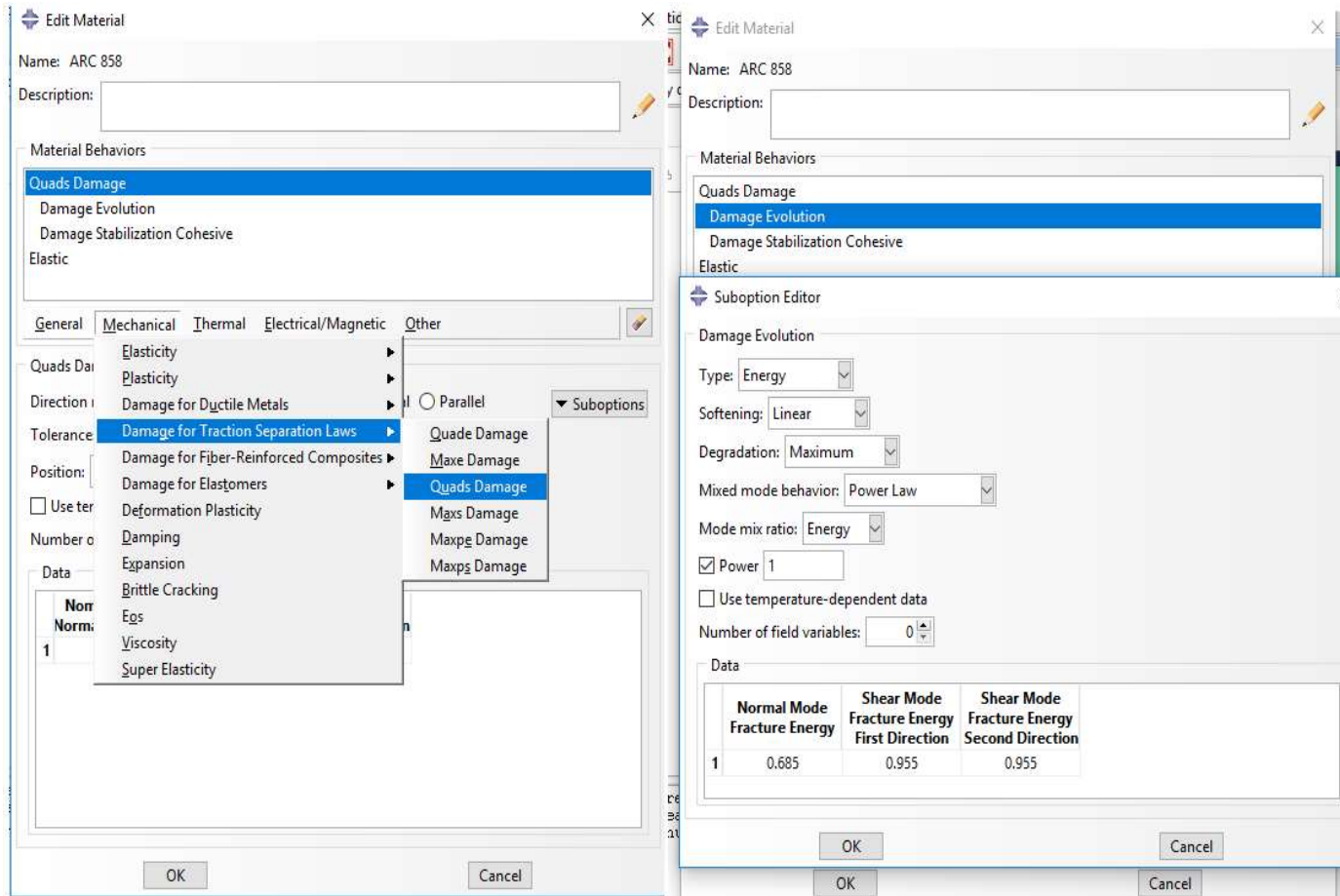
ENSAIO ENF - RESULTADOS

ENSAIO ENF - ARC 858		
CORPO DE PROVA	GIIC (N/mm)	
	Espessura adesiva: 0,4 mm	Espessura adesiva: 1,5
1	1,76	0,96
2	2,50	1,36
3	2,08	1,60
4	1,76	1,28
MÉDIA	2,025	1,300
DESVIO PADRÃO	0,351 (17%)	0,264 (20%)

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

MEF – ABAQUS

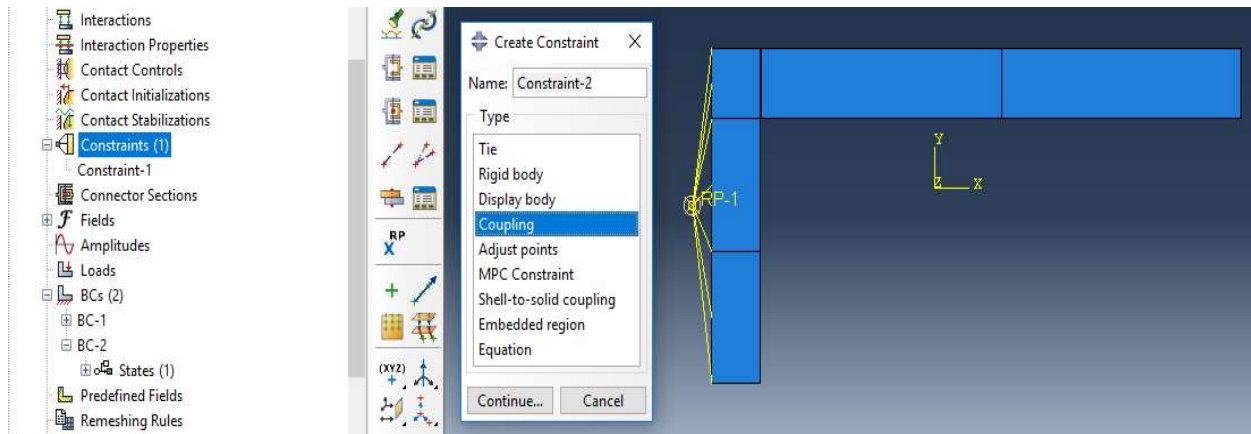
I. **MÓDULO PART**
Desenho da junta 2D ou 3D

II. **MÓDULO PROPERTY**
Atribuição das propriedades mecânicas do substrato e adesivo

MEF – ABAQUS

II. MÓDULO PROPERTY

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

MEF – ABAQUS

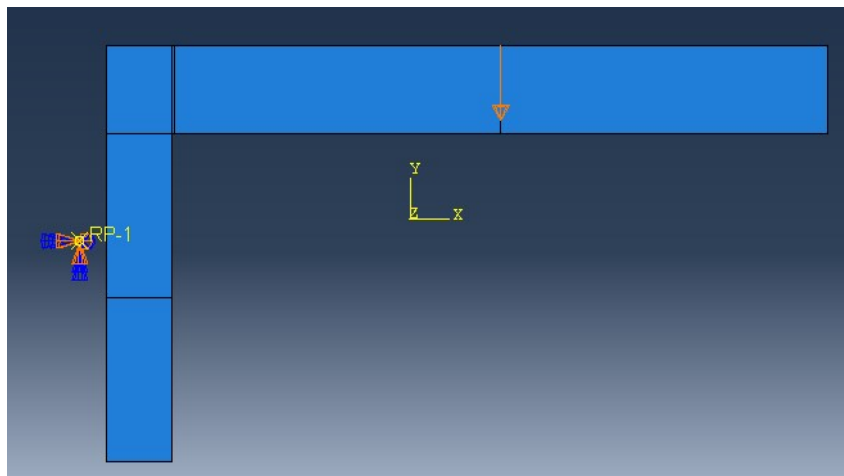
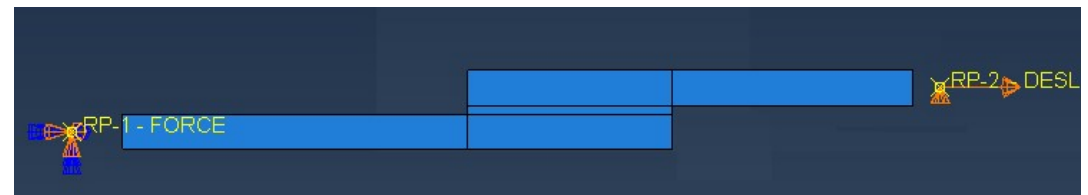
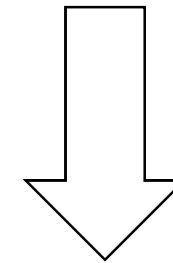
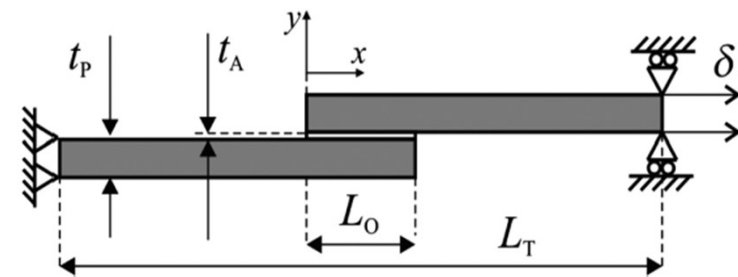
III. MÓDULO ASSEMBLY – Não aplicável para uma peça

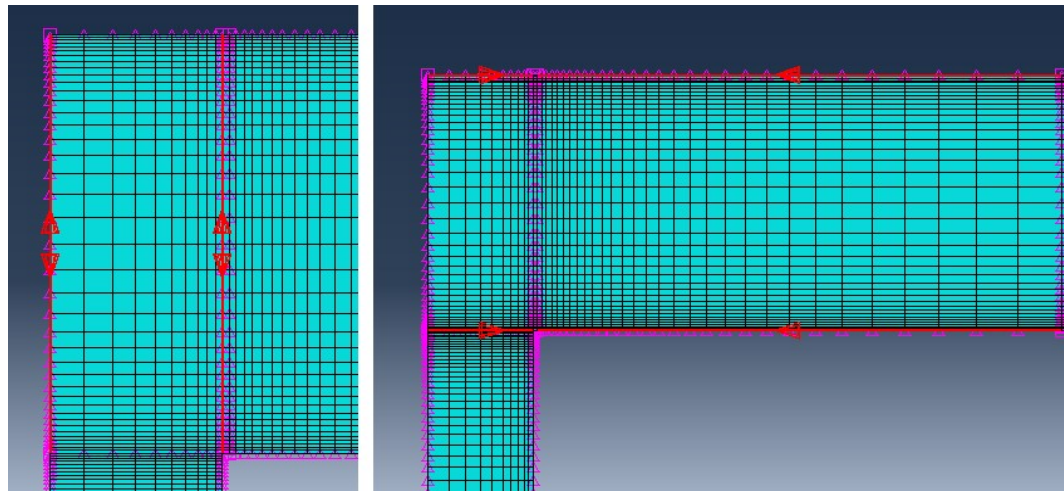
IV. MÓDULO STEP – Define os parâmetros de computação

V. MÓDULO INTERACTION – Acoplamento de elementos

MEF – ABAQUS

VI. MÓDULO LOAD – Não aplicável para uma peça

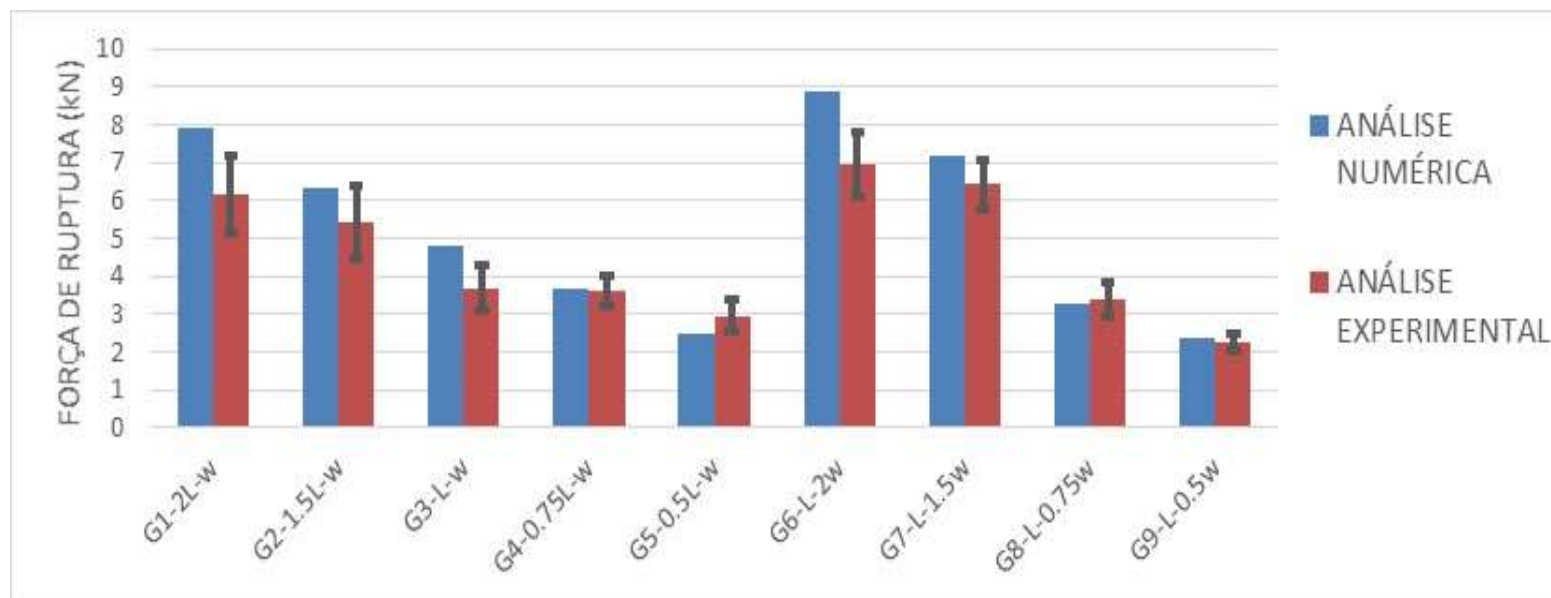
JCS

JCC

MEF – ABAQUS

VII. MÓDULO MESH – Divisão das malhas e refinamento

VIII. MÓDULO JOB – Execução da simulação

IX. MÓDULO RESULTS – Visualiza resultados, gera gráficos, tabelas, etc.

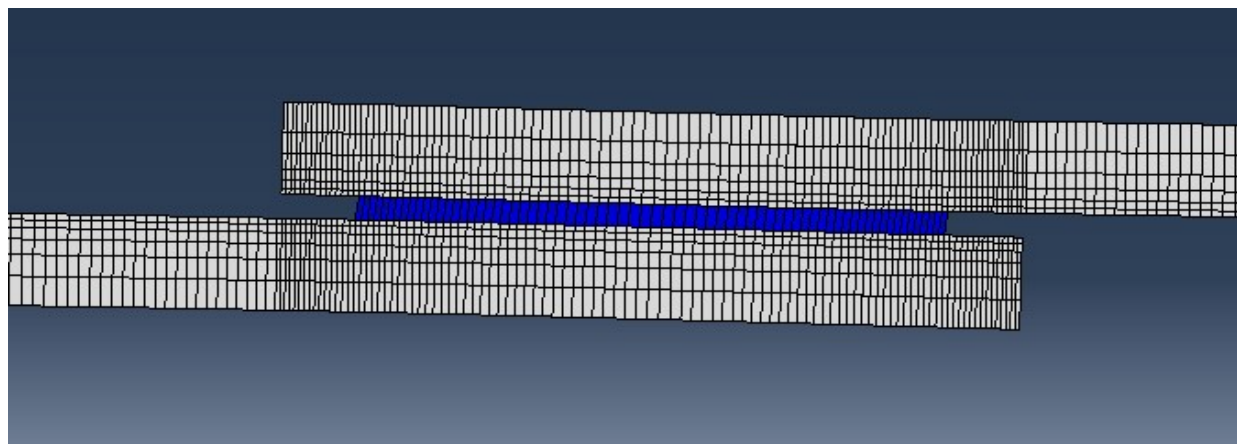
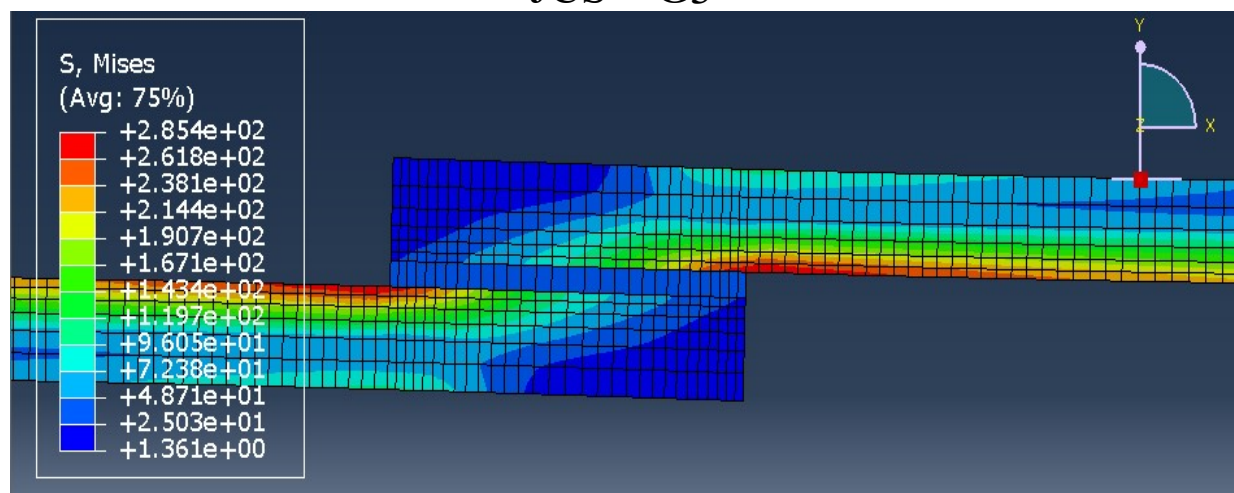
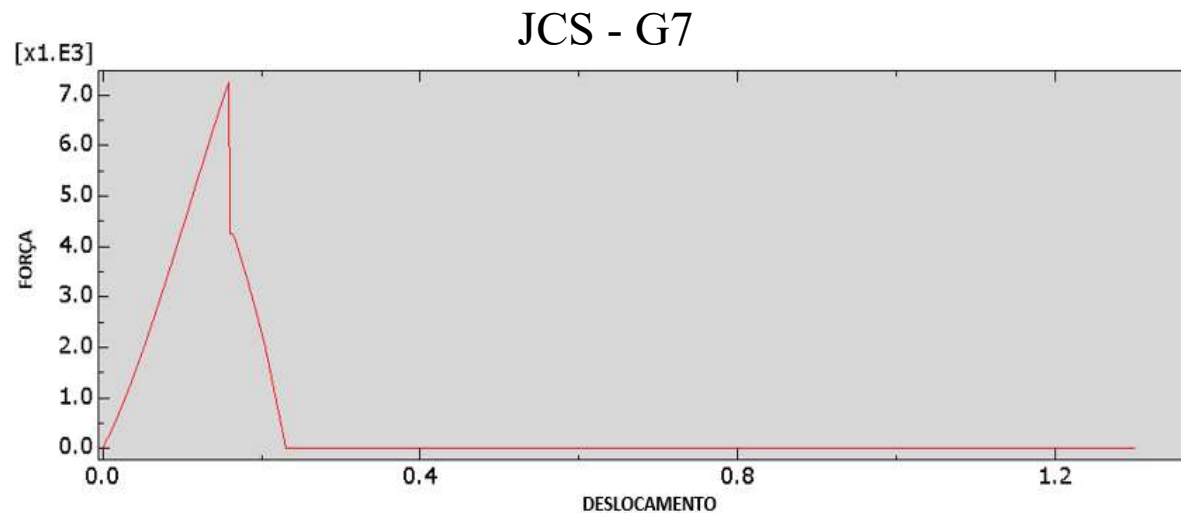
ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES (JCS)

GRUPOS	COMPRIMENTO	LARGURA	ÁREA	FORÇA DE RUPTURA ABAQUS (kN) - Fa	FORÇA DE RUPTURA ENSAIO - (kN) - Fe	DIFERENÇA % (Fa/Fe - 1)
1	2L	w	2A	7,9	6,16 ± 1,03 (16,74%)	28%
2	1,5L	w	1,5A	6,4	5,45 ± 0,96 (17,58%)	17%
3 (ASTM)	L	w	A	4,8	3,70 ± 0,58 (15,75%)	30%
4	0,75L	w	0,75A	3,7	3,62 ± 0,40 (11,04%)	2%
5	0,5L	w	0,5A	2,5	2,97 ± 0,45 (14,99%)	-16%
6	L	2w	2A	8,9	6,96 ± 0,86 (12,33%)	28%
7	L	1,5w	1,5A	7,2	6,43 ± 0,63 (9,79%)	12%
8	L	0,75w	0,75A	3,3	3,40 ± 0,44 (12,82%)	-3%
9	L	0,5w	0,5A	2,4	2,26 ± 0,25 (10,86%)	6%

RESULTADOS – JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES (JCS)

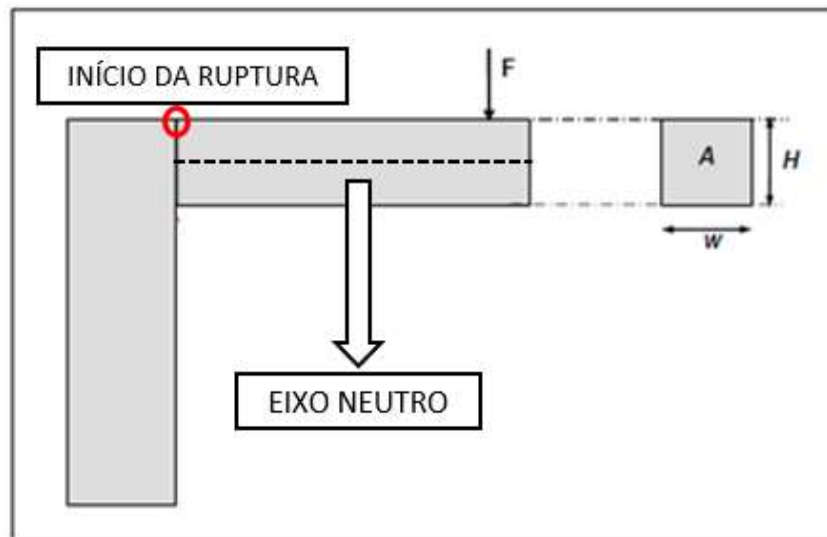
ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

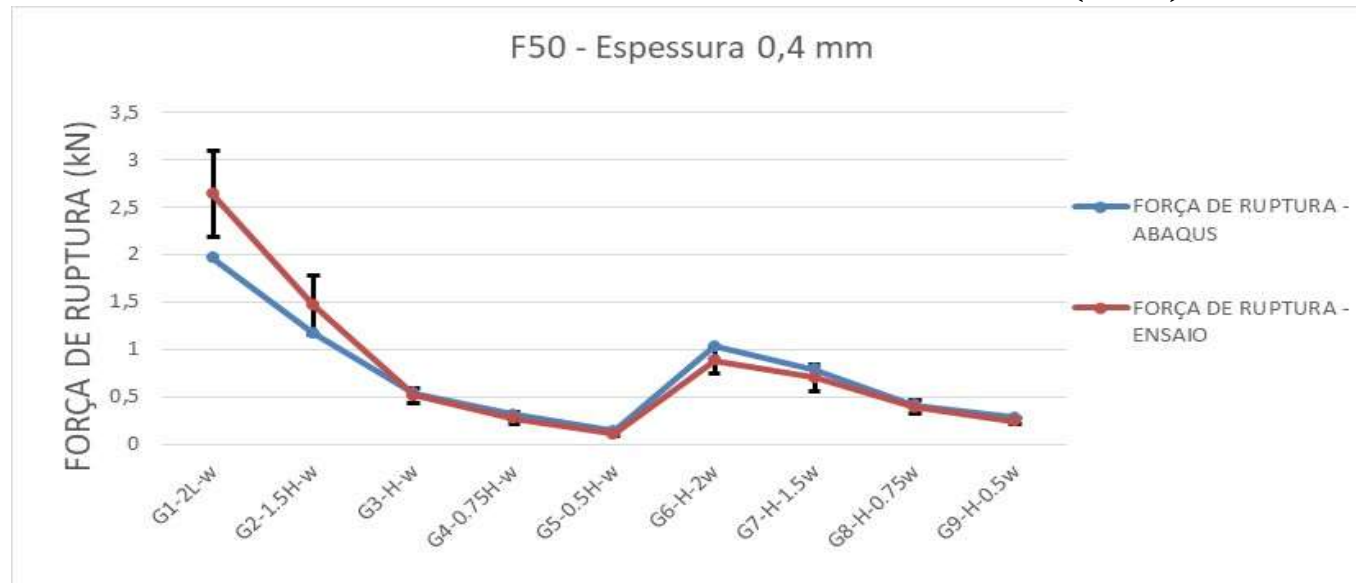
RESULTADOS – JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES (JCS)

JCS - G7

PARES DE GRUPOS COM MESMA ÁREA COLADA	DIFERENÇA % EXPERIMENTAL DOS VALORES DA FORÇA DE RUPTURA	DIFERENÇA % NUMÉRICA DOS VALORES DA FORÇA DE RUPTURA
G1 E G6	13%	13%
G2 E G7	18%	13%
G4 E G8	-6%	-11%
G5 E G9	-24%	-4%

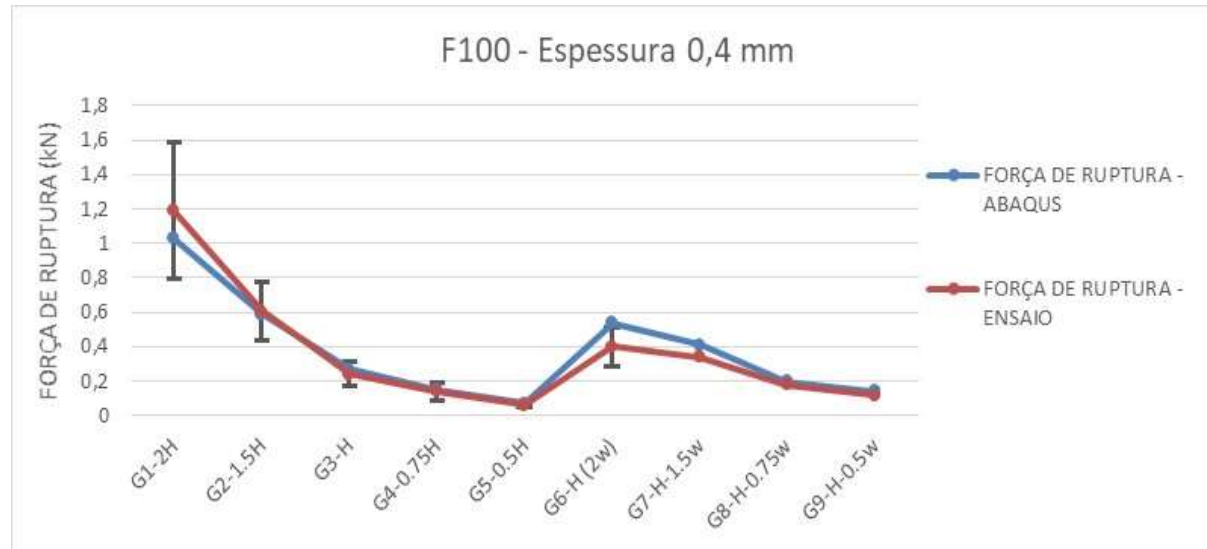
Avaliação do fator forma

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

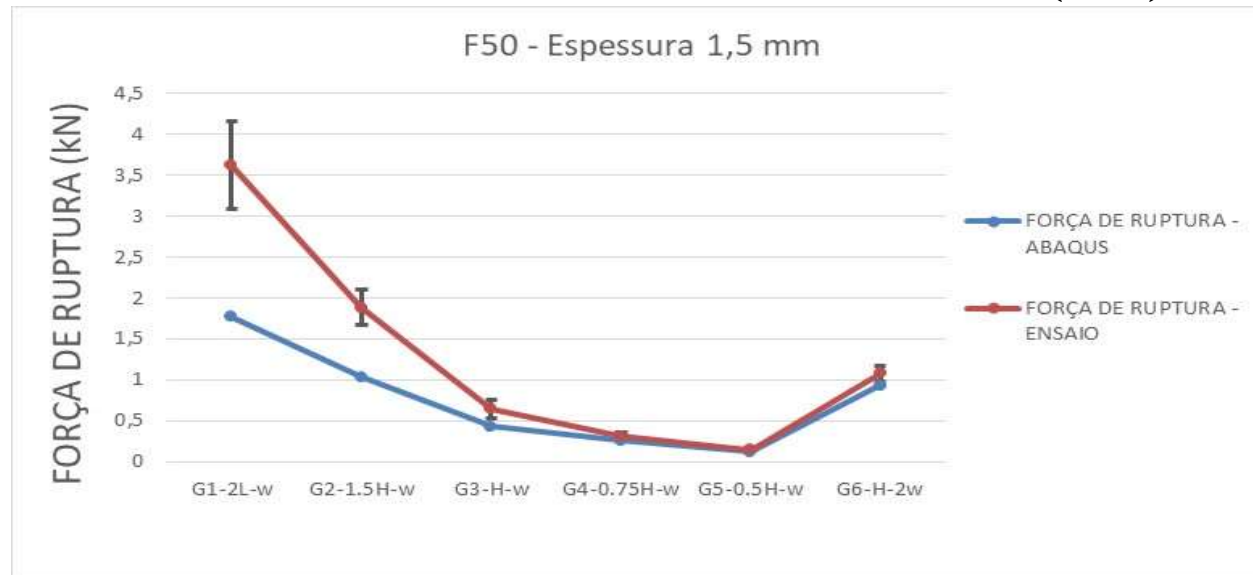
RESULTADOS – JUNTAS COM CARREGAMENTO COMBINADO (JCC)

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JCC – ESPESSURA ADESIVA 0.4 mm (F50)

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA - ABAQUS - Fa	FORÇA DE RUPTURA - ENSAIO - Fe	DESVIO PADRÃO DO EXPERIMENTO	DIFERENÇA % (Fa/Fe - 1)
	Espessura: 0.4 mm			
G1-2H-w	1,96	2,64	18%	-26%
G2-1.5H-w	1,17	1,47	21%	-20%
G3-H-w	0,54	0,51	17%	6%
G4-0.75H-w	0,31	0,27	23%	15%
G5-0.5H-w	0,14	0,11	27%	27%
G6-H-2w	1,03	0,88	15%	17%
G7-H-1.5w	0,79	0,7	20%	13%
G8-H-0.75w	0,41	0,39	18%	5%
G9-H-0.5w	0,28	0,24	11%	17%

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JCC – ESPESSURA ADESIVA 0.4 mm (F100)

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA - ABAQUS - Fa	FORÇA DE RUPTURA - ENSAIO - Fe	DESVIO PADRÃO DO EXPERIMENTO	DIFERENÇA % (Fa/Fe - 1)
	Espessura: 0.4 mm			
G1-2H	1,03	1,19	± 34%	**-13%**
G2-1.5H	0,59	0,61	± 28%	**-3%**
G3-H	0,27	0,24	± 28%	**13%**
G4-0.75H	0,15	0,14	± 34%	**7%**
G5-0.5H	0,07	0,06	± 24%	**17%**
G6-H (2w)	0,54	0,4	± 27%	**35%**
G7-H-1.5w	0,41	0,34	± 34%	**21%**
G8-H-0.75w	0,20	0,18	± 38%	**11%**
G9-H-0.5w	0,14	0,12	± 29%	**17%**

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JCC – ESPESSURA ADESIVA 1.5 mm (F50)

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA ABAQUS - Fa	FORÇA DE RUPTURA - ENSAIO - Fe	DESVIO PADRÃO DO EXPERIMENTO	DIFERENÇA % (Fa/Fe - 1)
	Espessura: 1.5 mm			
G1-2H-w	1,77	3,622	± 15%	-51%
G2-1.5H-w	1,04	1,882	± 11%	-45%
G3-H-w	0,43	0,646	± 17%	-33%
G4-0.75H-w	0,26	0,315	± 14%	-17%
G5-0.5H-w	0,12	0,146	± 10%	-18%
G6-H-2w	0,93	1,076	± 10%	-14%

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JCC – ESPESSURA ADESIVA 1.5 mm (F100)

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA - ABAQUS - Fa	FORÇA DE RUPTURA - ENSAIO - Fe	DESVIO PADRÃO DO EXPERIMENTO	DIFERENÇA % (Fa/Fe - 1)
	Espessura: 1.5 mm			
G1-2H	0,89	1,77	± 11%	-50%
G2-1.5H	0,53	0,906	± 10%	-42%
G3-H	0,24	0,328	± 14%	-27%
G4-0.75H	0,13	0,157	± 20%	-17%
G5-0.5H	0,06	0,075	± 12%	-20%
G6-H (2w)	0,47	0,533	± 12%	-12%

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JCC – F50 x F100

Espessura 0.4 mm

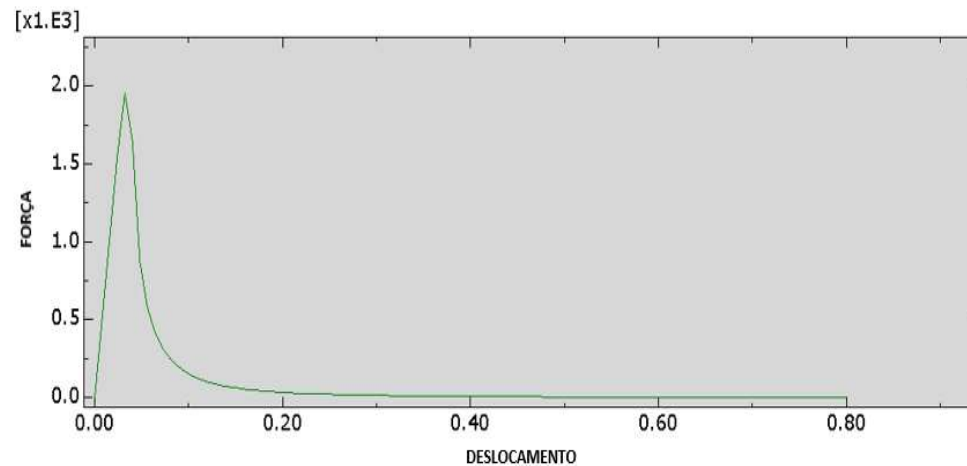
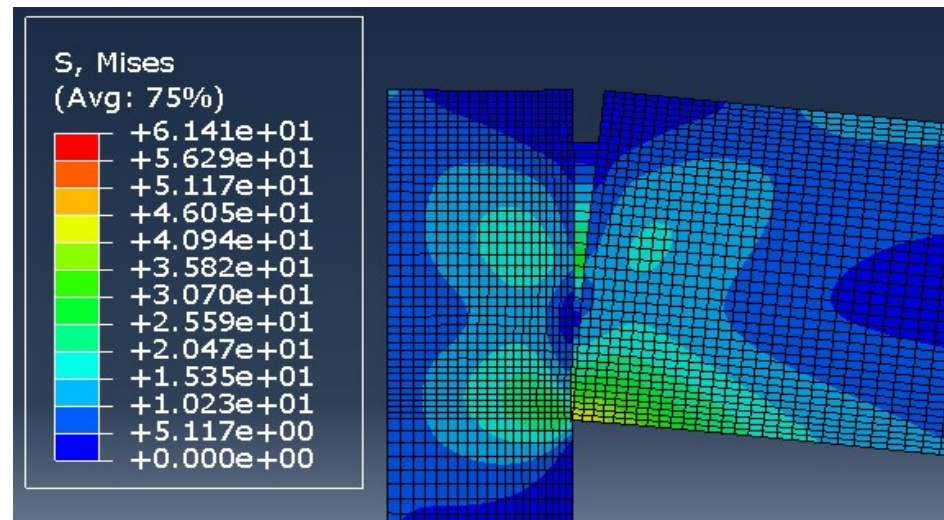
Grupos	DADOS EXPERIMENTAIS			DADOS NUMÉRICOS		
	FORÇA DE RUPTURA - F50	FORÇA DE RUPTURA - F100	REDUÇÃO %	FORÇA DE RUPTURA - F50	FORÇA DE RUPTURA - F100	REDUÇÃO %
1	2,64	1,19	55%	1,96	1,03	53%
2	1,47	0,61	59%	1,17	0,59	50%
3 (ASTM)	0,51	0,24	53%	0,54	0,27	50%
4	0,27	0,14	48%	0,31	0,15	48%
5	0,11	0,06	45%	0,14	0,07	50%
6	0,88	0,4	55%	1,03	0,54	52%
7	0,7	0,34	51%	0,79	0,41	52%
8	0,39	0,18	54%	0,41	0,2	49%
9	0,24	0,12	50%	0,28	0,14	50%

Espessura 1.5 mm

Grupos	DADOS EXPERIMENTAIS			DADOS NUMÉRICOS		
	FORÇA DE RUPTURA - F50	FORÇA DE RUPTURA - F100	REDUÇÃO %	FORÇA DE RUPTURA - F50	FORÇA DE RUPTURA - F100	REDUÇÃO %
1	3,622	1,774	49%	1,77	0,89	50%
2	1,882	0,906	48%	1,04	0,53	51%
3 (ASTM)	0,646	0,328	51%	0,43	0,24	56%
4	0,315	0,157	50%	0,26	0,13	50%
5	0,146	0,075	51%	0,12	0,06	50%
6	1,076	0,533	50%	0,93	0,47	51%

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JUNTAS COM CARREGAMENTO COMBINADO – F50

JCC – G1-F50
ESP. 0.4 mm

JCC – G2-F50
ESP. 0.4 mm

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JCC – DIFERENTES ESPESSURAS

Gráfico - F50 – Dados experimentais

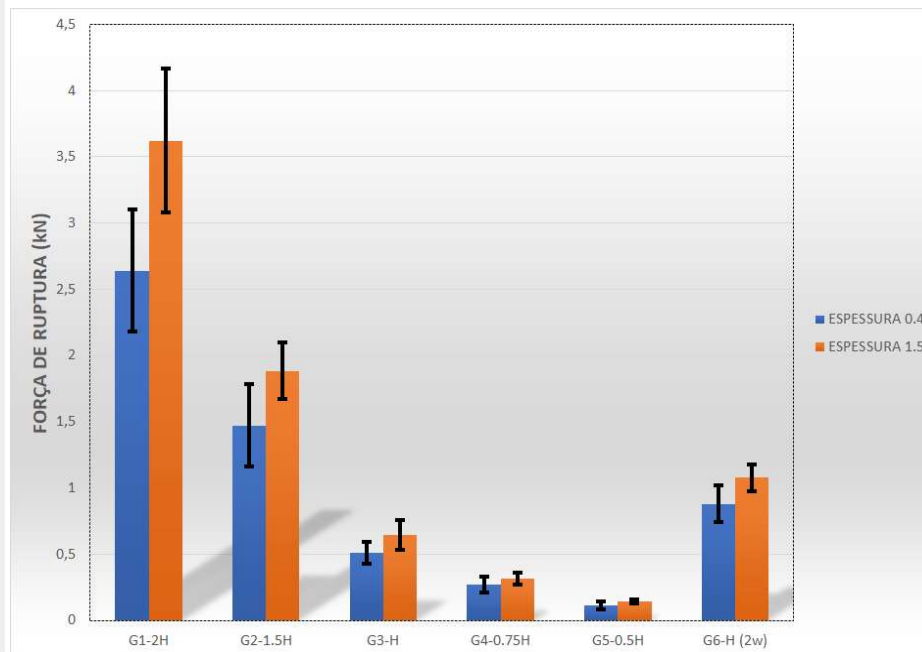



Tabela - F50 – Dados experimentais

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F1	DESVIO PADRÃO	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F2	DESVIO PADRÃO	AUMENTO %
	Espessura: 0.4 mm		Espessura: 1.5 mm		(F2/F1 – 1)
G1-2H	2,64	0,46	3,622	0,542	37%
G2-1.5H	1,47	0,31	1,882	0,214	28%
G3-H	0,51	0,085	0,646	0,112	27%
G4-0.75H	0,27	0,062	0,315	0,044	17%
G5-0.5H	0,11	0,029	0,146	0,015	33%
G6-H (2w)	0,88	0,14	1,076	0,103	22%

Tabela - F50 – Dados numéricos

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F1	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F2	DIMINUIÇÃO %
	Espessura: 0.4 mm	Espessura: 1.5 mm	(F2/F1 – 1)
G1-2L-w	1,96	1,77	-10%
G2-1.5H-w	1,17	1,04	-11%
G3-H-w	0,54	0,43	-20%
G4-0.75H-w	0,31	0,26	-16%
G5-0.5H-w	0,14	0,12	-14%
G6-H-2w	1,03	0,93	-10%

IPRJ

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

RESULTADOS – JCC – DIFERENTES ESPESSURAS

Gráfico – F100 – Dados experimentais

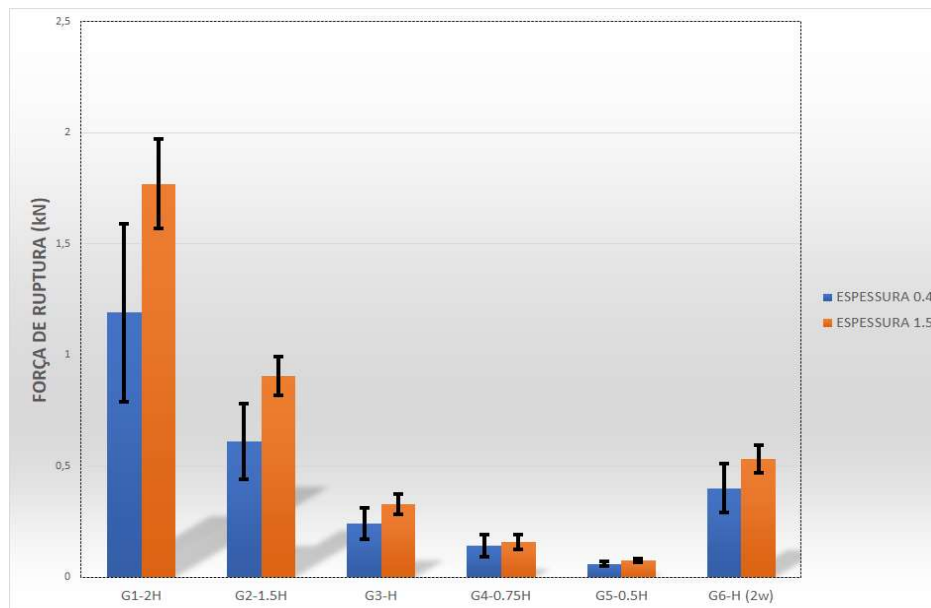



Tabela – F100 – Dados experimentais

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F1	DESVIO PADRÃO	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F2	DESVIO PADRÃO	AUMENTO %
	Espessura: 0.4 mm		Espessura: 1.5 mm		(F2/F1 – 1)
G1-2H	1,19	0,4	1,77	0,201	49%
G2-1.5H	0,61	0,17	0,906	0,087	49%
G3-H	0,24	0,07	0,328	0,047	37%
G4-0.75H	0,14	0,05	0,157	0,032	12%
G5-0.5H	0,06	0,01	0,075	0,009	25%
G6-H (2w)	0,4	0,11	0,533	0,062	33%

Tabela – F100 – Dados numéricos

GRUPO	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F1	FORÇA DE RUPTURA (kN) – F2	DIMINUIÇÃO %
	Espessura: 0.4 mm	Espessura: 1.5 mm	(F2/F1 – 1)
G1-2H	1,03	0,89	-14%
G2-1.5H	0,59	0,53	-10%
G3-H	0,27	0,24	-11%
G4-0.75H	0,15	0,13	-13%
G5-0.5H	0,07	0,06	-14%

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO UERJ

IPRJ

CONCLUSÕES

- **Início da implantação da ferramenta computacional na análise do comportamento mecânico de juntas coladas**

ANÁLISE NUMÉRICA X EXPERIMENTAL

- **Juntas de cisalhamento simples**
  - ❖ Total de 9 grupos
  - ❖ 6 grupos com diferença máxima de 20%
  - ❖ Fator forma em acordo

- **Juntas de carregamento combinado**
  (F50 - espessura 0.4 mm)
  - ❖ Total de 9 grupos
  - ❖ 6 grupos dentro do DP dos experim.
  - ❖ Fator forma em acordo

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

CONCLUSÕES

ANÁLISE NUMÉRICA X EXPERIMENTAL

- **Juntas de carregamento combinado**
  (F100 - espessura 0.4 mm)
  - ❖ Total de 9 grupos
  - ❖ 8 grupos dentro do DP dos experim.
  - ❖ Fator forma em acordo

- **Juntas de carregamento combinado**
  (F50 - espessura 1.5 mm)
  - ❖ Total de 6 grupos
  - ❖ 3 grupos com diferença máxima de 20%
  - ❖ Fator forma em acordo
  - ❖ Problemas nas juntas com maior 'h'

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

CONCLUSÕES

ANÁLISE NUMÉRICA X EXPERIMENTAL

- **Juntas de carregamento combinado** **(F100 - espessura 1.5 mm)**
  - ❖ Total de 6 grupos
  - ❖ 3 grupos com diferença máxima de 20%
  - ❖ Fator forma em acordo
  - ❖ Problemas nas juntas com maior ‘h’

- **Juntas com espessuras diferentes** **(F50 e F100)**
  - ❖ Total de 6 grupos
  - ❖ Divergência das análises
  - ❖ Fator forma em desacordo

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL – JCS E JCC

CONCLUSÕES

ENSAIOS DCB E ENF

MÉTODO CBBM - Possíveis fontes de erro:

- **Considera a linearidade do curva força x deslocamento no carregamento dos corpos de prova.**
- **Não mede efetivar**
- **Efeitos de atrito e**